

На основе представленных задач с помощью численных расчетов можно будет выявить основные особенности систем молниезащит в виде стержневых молниеотводов активного и пассивного типов, учитывая весьма острые дискуссии относительно их эффективности

УДК 621.316.98: 22.193

Т.А. Потапенко, студентка гр. ЭА-41
Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова

ПРИМЕНЕНИЕ ЧИСЛЕННОГО МЕТОДА ИНВЕРСИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АКТИВНЫХ И ПАССИВНЫХ СТЕРЖНЕВЫХ МОЛНИЕОТВОДОВ В ПОЛУБЕСКОНЕЧНЫХ ОБЛАСТЯХ

Введение. Разряды атмосферного электричества весьма опасное явление в природе. Образующиеся молнии непосредственно угрожают жизни людей и животных, а при отсутствии систем молниезащит могут привести к повреждению или уничтожению домов, сооружений, электрооборудования, промышленных коммуникаций и др. Существующие системы молниезащит содержат: молниеотводы, токоотводы-проводники и заземлители, а также систему уравнивания потенциалов и систему защиты от перенапряжений. Среди схем систем молниезащит с учетом вида молниеотводов можно выделить такие как стержневые молниеотводы, молниеотводы типа «пространственная сетка» (металлическая сетка на объекте), тросовые молниеотводы (например, для линий электропередач (ЛЭП)), специальные молниеотводы зонтикового типа с коронирующей системой игольчатых электродов и в виде стержневого молниеотвода с применением импульсного электромагнитного устройства (ИЭУ). Первые три типа молниеотводов относятся к пассивным, а последние – к активным типам.

Молниеотвод с ИЭУ может быть, например, выполнен в виде устройства типа Prevestron 2 (компании INDELEC, Франция) с расположенным ИЭУ на верху стержня [1]. При этом, как правило, конструкция ИЭУ не раскрывается изготовителем. В отличие от существующих молниеотводов пассивного типа молниеотводы с ИЭУ, например, Prevestron 2, разработанные только в конце двадцатого столетия, основаны на создании так называемого «встречного разряда». Они имеют относительно высокую надежность, способны защищать достаточно большую площадь и при этом сохраняют эстетику строения в отличие от молниезащиты типа «пространственной сетки». Полевые испытания, выполненные во Флориде (США) в 1993 - 1995 годах, для устройств типа Prevestron 2 в сравнении с одиночным стержнем показали преимущества молниеотвода активного типа [1].

При этом необходимо отметить, что в практике молниезащиты молниеотводы зонтикового типа с коронирующей системой игольчатых электродов и в виде стержневого молниеотвода с применением ИЭУ в настоящее время являются предметом весьма острых дискуссий [2].

1. Постановка задачи. Для численного исследования стержневых молниеотводов с применением ИЭУ и без него предлагается использование численного метода инверсии для полубесконечной области [3]. Особенность этого метода заключается в применении специального приема для перехода от моделируемой области D к некоторой составной из D' и D^* . При этом при переходе от D' к D^* с помощью инверсии сохраняется шаблон расчетной схемы в силу свойства конформных отображений сохранения углов и постоянства растяжений.

Рассмотрим особенности расчета электростатических полей (ЭП) стержневых элек-

проводов пассивного и активного типов в полубесконечной области относительно проводящей плоскости (поверхности земли) Z_k . При этом исследуются две задачи, а именно, в одной из них определяется ЭП электрода (модель молниеотвода пассивного типа) относительно проводящей плоскости Z_k и некоторой плоской границы, являющейся моделью облака над электродом, например, как в [4].

Во второй задаче постановка аналогична первой, но определяется ЭП стержневого электрода, являющегося моделью молниеотвода активного типа, расположенного вертикально на проводящей плоскости Z_k с возможностью возбуждения ЭДС от ИЭУ, причем находящегося в верхней его части, причем изолированной от остальной части электрода.

Считаем, что в обоих случаях исследуется квазистатический режим процесса как в [2, 4], причем для второй задачи учитывается возникновение в некоторый момент времени на электроде длиной l_0 в верхней его части длиной l_1 потенциала ψ_1 . Этот прием применяется, например, в [5] при исследованиях ЭП для трехфазных ЛЭП 735 кВ (компания «Гидро-Квебек»), причем ЭП определяется для некоторых моментов времени t_i с учетом поочередного изменения условий на фазных проводах.

1.1. Постановка первой задачи. Основная схема для моделирования стержневых молниеотводов активного и пассивного типов показана на рис. 1. В полубесконечной области с учетом симметрии задачи выделяется некоторая область $B(x,y,z)$.

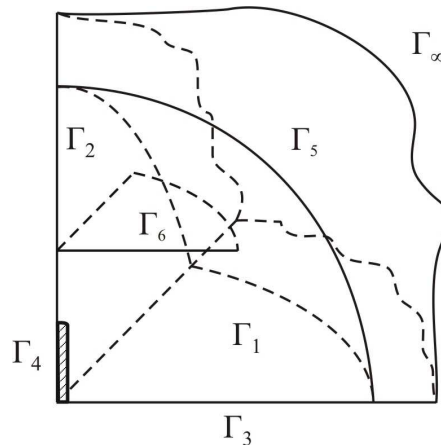


Рис 1. Схема для моделирования стержневых молниеотводов активного и пассивного типов

В выделенной части полубесконечной области $B(x,y,z)$ определяется объемное поле относительно проводящей плоскости Z_k на основе уравнения Лапласа [6]:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = 0; \quad (x,y,z) \in B(x,y,z). \quad (1)$$

Граничные условия для этой задачи следующие:

- на проводящей плоскости в виде границе Γ_1 (нижняя часть исследуемой области $B(x,y,z)$):

$$\psi(x,y,z) = 0, \quad (x,y,z) \in \Gamma_1; \quad (2)$$

- на границе полубесконечной области Γ_∞ :

$$\psi(\infty) = 0; \quad (3)$$

- на поверхностях симметрии в виде границ Γ_2 и Γ_3 (на боковых поверхностях исследуемой области $B(x,y,z)$):

$$\frac{\partial \psi}{\partial n} = 0, \quad (x, y, z) \in \Gamma_2, \Gamma_3; \quad (4)$$

- на части круга в виде границы Γ_6 , находящейся над стержневым электродом в исследуемой области $B(x, y, z)$:

$$\psi(x, y, z) = \psi_0, \quad (x, y, z) \in \Gamma_6; \quad (5)$$

- на стержневом электроде Γ_4 (без ИЭУ), вертикально расположенном на границе Γ_1 :

$$\psi(x, y, z) = 0, \quad (x, y, z) \in \Gamma_4, \quad (6)$$

где $B(x, y, z)$ – расчетная область, ограниченная $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4, \Gamma_6, \Gamma_\infty$, причем Γ_∞ – условная граница на бесконечности. Для выполнения расчетов в области $B(x, y, z)$ введена некоторая внутренняя граница Γ_5 (искусственная граница для решения задачи с использованием метода инверсии для полубесконечных областей [3]), необходимая для выделения некоторой условно ограниченной области $B_m(x, y, z)$.

Принимаем, что часть дополнительно выделенной области в виде $B_m(x, y, z)$, входящей в состав $B(x, y, z)$, является основной, так как в ней задаются границы исследуемых объектов. В рассматриваемом случае $B_m(x, y, z)$ имеет форму части полусферы с некоторым радиусом R_0 с учетом границ $\Gamma_1 - \Gamma_5$ (для упрощения численного моделирования область $B(x, y, z)$ может быть представлена в виде куба, параллелепипеда и др.). Для реализации метода необходима дополнительная область $B_m^*(x, y, z)$ с учетом вида основной области $B_m(x, y, z)$ для того, чтобы часть области $B(x, y, z)$, находящаяся между границами Γ_5 и Γ_∞ , отобразилась на область $B_m^*(x, y, z)$. При этом на границе области $B_m^*(x, y, z)$, расположенной по диаметру этой части полусферы, присваивается значение, совпадающее со значением потенциала ψ на бесконечности Γ_∞ (с учетом отображения области между границами Γ_5 и Γ_∞ на область $B_m^*(x, y, z)$). При этом считаем, что области $B_m(x, y, z)$ и $B_m^*(x, y, z)$ являются, как бы склеенными по соприкасающейся поверхности Γ_5 [3]. При этом важно отметить, что граница Γ_6 в виде части круга над стержневым электродом условно считается моделируемым облаком, как в [4]

1.2. Постановка второй задачи аналогична первой за исключением граничного условия (6), вместо которого используются следующие дополнительные два условия:

- на верхней части стержневого электрода с ИЭУ в виде границы Γ_{41} :

$$\psi(x, y, z) = \psi_1, \quad (x, y, z) \in \Gamma_{41}; \quad (7)$$

- на оставшейся части стержневого электрода с ИЭУ в виде границы Γ_{42} :

$$\psi(x, y, z) = 0, \quad (x, y, z) \in \Gamma_{42}. \quad (8)$$

Схема с учетом условного представления стержневого молниеотвода активного типа в виде 2-х частей Γ_{41} и Γ_{42} показана на рис. 2.

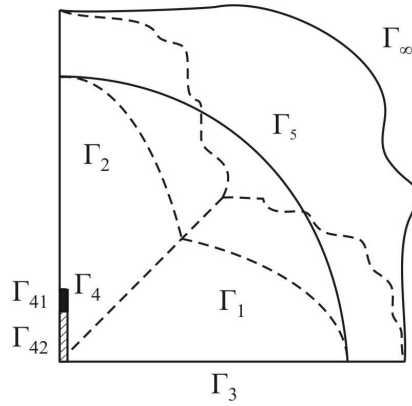


Рис 2. Схема стержневого молниеотвода активного типа с учетом расположения ИЭУ на Г₄₁

При этом необходимо отметить, что части стержней Г₄₁ и Г₄₂ изолированы друг от друга [1, 2]. Следовательно, основной задачи являются исходные уравнения (1-5 и 7, 8).

2. Дискретная модель и численный метод исследования

Для первой задачи с учетом уравнения (1) и граничных условий (2) – (6) для дискретной области B_d уравнения в операторной форме при определении потенциала ψ в узлах (i,j,k) имеют следующий вид:

$$\Omega_h \psi^{(h)} \equiv \begin{cases} \Omega_{xx} \psi_{ijk} + \Omega_{yy} \psi_{ijk} + \Omega_{zz} \psi_{ijk} = 0, (x_i, y_j, z_k) \in B_d; \\ \Omega_n \psi_{ijk} = 0, (x_i, y_j, z_k) \in \Gamma_2, \Gamma_3; \\ \psi_{ijk} = \psi_0, (x_i, y_j, z_k) \in \Gamma_6; \\ \psi_{ijk} = 0, (x_i, y_j, z_k) \in \Gamma_1, \Gamma_4, \Gamma_\infty. \end{cases} \quad (9)$$

Здесь $\Omega_{xx} = \partial^2 / \partial x^2$, $\Omega_{yy} = \partial^2 / \partial y^2$, $\Omega_{zz} = \partial^2 / \partial z^2$, $\Omega_n = \partial / \partial n$, причем производные потенциала в системе уравнений (9) представляются конечно-разностными аппроксимациями. В связи с тем, что $B_{md}(x,y,z)$ и $B_{md}^*(x,y,z)$, входящие в область B_d , являются частями полусфер, а граница Г₄ – стержень, поэтому в этих областях применяем регулярную прямоугольную сетку.

Учитывая, что во внутренних узлах сетки выполняется условие сходимости итерационного метода Гаусса-Зейделя, тогда во всех внутренних узлах области $B_{md}(x,y,z) \cup B_{md}^*(x,y,z)$ потенциал $\psi_{i,j,k}$ рассчитывается с помощью численного метода, например, экстраполяционного метода Либмана [7] по формулам:

$$\psi_{i,j,k} = \frac{\psi_{i+1,j,k} + \psi_{i-1,j,k} + \psi_{i,j+1,k} + \psi_{i,j-1,k} + \psi_{i,j,k+1} + \psi_{i,j,k-1}}{6}, \quad (10)$$

$$\psi_{i,j,k}^S = \psi_{i,j,k}^{S-1} + \alpha(\psi_{i,j,k}^{S0} - \psi_{i,j,k}^{S-1}), \quad (11)$$

где α – ускоряющий коэффициент ($1 \leq \alpha \leq 2$); $\psi_{i,j,k}^{S-1}$ – значение в узле $\psi_{i,j,k}$, вычисленное на предыдущей итерации; $\psi_{i,j,k}^{S0}$ – значение в узле $\psi_{i,j,k}$, вычисленное в текущей итерации согласно формуле (10); $\psi_{i,j,k}^S$ – новое значение.

На границах Г₂, Г₃ потенциал $\psi_{i,j,k}$ рассчитывается на основе конечно-разностных аппроксимаций с учетом условия (4), а на остальных граничных узлах $\psi_{i,j,k}$ задаются постоянные значения потенциал (условия (2,3) и (5,6)). Граничные узлы $\psi_{i,j,k}$ на поверхности Г₅ – это внутренние узлы составной области $B_{md}(x,y,z)$ и $B_{md}^*(x,y,z)$, таким

образом, в узлах области $B_{md}(x,y,z)$ расчет так же ведется по формулам (10) и (11), а значения потенциала в недостающих узлах берутся из дополнительной области $B_{md}^*(x,y,z)$, и наоборот. В связи с этим граничное условие на поверхности Γ_5 отсутствует.

Для второй задачи с учетом уравнений (1-5 и 7, 8) дискретная модель и численный метод исследования аналогичны первой и уравнения в операторной форме при определении потенциала ψ в узлах (i,j,k) имеют следующий вид:

$$\Omega_h \psi^{(h)} \equiv \begin{cases} \Omega_{xx} \psi_{ijk} + \Omega_{yy} \psi_{ijk} + \Omega_{zz} \psi_{ijk} = 0, (x_i, y_j, z_k) \in B_d; \\ \Omega_n \psi_{ijk} = 0, (x_i, y_j, z_k) \in \Gamma_2, \Gamma_3; \\ \psi_{ijk} = \psi_0, (x_i, y_j, z_k) \in \Gamma_6; \\ \psi_{ijk} = \psi_1, (x_i, y_j, z_k) \in \Gamma_{41}; \\ \psi_{ijk} = 0, (x_i, y_j, z_k) \in \Gamma_1, \Gamma_{42}, \Gamma_\infty. \end{cases} \quad (12)$$

Компоненты напряженности электрического поля E_x , E_y и E_z с использованием центрально-разностной аппроксимации в этих задачах определяются как

$E_i = -(\partial \psi_{i+1,j,k} - \partial \psi_{i-1,j,k}) / 2h$; $E_j = -(\partial \psi_{i,j+1,k} - \partial \psi_{i,j-1,k}) / 2h$; $E_k = -(\partial \psi_{i,j,k+1} - \partial \psi_{i,j,k-1}) / 2h$, где i – изменение по координате x ; j – изменение по координате y ; k – изменение по координате z ; h – величина шага с учетом регулярной прямоугольной сетки.

Выводы

Можно отметить следующее. Начиная с 1753 г., когда Б. Франклин (США) изобрел громоотвод, появляется понятие – «молниезащита», а затем около двух столетий идет развитие этого подхода. В 80-х годах прошлого столетия появляются новые принципы построения систем молниезащит. Например, компания INDELEC (Франция) разрабатывает молниеотвод типа Prevectron в виде стержня с импульсным электромагнитным устройством в его верхней части, предназначенного для активирования стержневого электрода на основе принципа электромагнитной индукции от разрядов атмосферного электричества и позволяющего создать более сильную ионизацию вокруг стержня, для образования «встречного разряда». На основе сформулированных задач (уравнения (11) и (12)) с помощью численных расчетов можно будет выявить основные особенности этих систем молниезащит, учитывая весьма острые дискуссии относительно эффективности стержневых молниеотводов активного и пассивного типов.

Литература

1. <http://www.prevectron.ru>
2. Базелян, Э.М. Молниезащита высоких сооружений/ Э.М. Базелян// Известия академии наук. Энергетика. – 2005. – №3. – С. 55-74.
3. Элементы доказательства метода инверсии внешней бесконечной области/ А.Н. Потапенко, М.И. Дыльков, А.И. Штифанов// Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2003. – №6. – С. 186-188.
4. Резинкина, М.М. Расчет трехмерных электрических полей в системах, содержащих тонкие проволоки/ М.М. Резинкина// Электричество. – 2005. – № 1. – С. 44–49.
5. Yang Y., Dallaire D., Ma J., Dawalibi F.P. The strip simulation method for computing electric field on conductor surfaces // Proceedings of the Third IASTED International Conference on Power and Energy Systems, EuroPES 2003, Marbella, Spain, Sept. 3-5. – 2003. – P. 353-357.
6. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле: Учебник / Л.А. Бессонов. – М.: Гардарики, 2001. – 317 с.
7. Сипайлов, Г.А. Электрические машины (специальный курс)/ Г.А. Сипайлов, Е.В. Кононенко, К.А. Хорьков – М.: Высш. шк., 1987. – 287 с

ЗАСТОСУВАННЯ ЧИСЕЛЬНОГО МЕТОДУ ІНВЕРСІЇ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ
АКТИВНИХ І ПАСИВНИХ СТРИЖНЕВИХ БЛИСКАВКОВІДВОДІВ У
НАПІВНЕСКІНЧЕННИХ ОБЛАСТЯХ

Т.А. Потапенко

На основі представлених завдань за допомогою чисельних розрахунків можна буде виявити основні особливості систем блискавкозахистів у вигляді стрижневих блискавководів активного та пасивного типів, з огляду на досить гострі дискусії щодо їх ефективності.

INVERSION NUMERIZED METHOD APPLICATION FOR EXPLORATION OF ACTIVE
AND PASSIVE LIGHTING GROUNDS IN SEMI-INFINITE RANGES

T.A. Potapenko

On base of the presented problems by means of numerical calculation will possible reveal main peculiarities of the systems lightning protection in the manner of pivotal lightning rod active and passive types, considering more sharp debates for their efficiency